レーザー解説

エキシマ光源の原理

前田 三男*

(1995年10月30日 受理)

Principles of Excimer Light Sources

Mitsuo MAEDA*

(Received October 30, 1995)

Excimer lasers and excimer lamps provided efficient and high-power UV sources for applications of laser-induced chemistry and laser processing. After the emission mechanism of excimers and the spectroscopy of excimers were briefly reviewed, excitation methods and system constructions of excimer lasers were described. Especially for discharge-pumped rare-gas halide excimer lasers, detailed description of laser system, gas treatment and simulation analysis was made.

Key Words: Excimer laser, Excimer kinetics, Discharge pumping, E-beam pumping, Rare-gas halide

1. エキシマとは何か¹⁻⁴⁾

励起状態の原子が結合して分子になったものをエキシマ (excimer), あるいはエキシプレックス (exciplex) という。たとえば, 希ガス原子は電子が閉殻をなしているため, 通常は不活性で分子を作らない。しかし励起された原子あるいはイオンは反応性を持ち, Kr_2 とか KrF といったエキシマを形成する。しかし, エキシマは一般に不安定な分子で, 短い寿命で分解し, その際に励起エネルギーに対応する光子を放出する。

エキシマの発光に関する研究は歴史をさかのぼると, 1927年に Rayleigh が Hg_2 のスペクトルを観測したのが最初とされている⁵⁾。その後30年代から60年代にかけて, 放電やビーム励起

による希ガスエキシマの真空紫外 (VUV) 域における発光の研究を, 数多く見出すことができる。

最初のエキシマレーザーの提案は1966年に Basov によってなされ⁶⁾, 1970年に発振に成功した⁷⁾。これは液化した Xe をパルス電子ビームで励起し, 波長172 nmで Xe_2 の発振を得たものである。さらに1972年から1974年にかけて高気圧の希ガスを電子ビームで励起し, Xe_2 , Kr_2 , Ar_2 の発振がVUV域で報告されている⁸⁾。

また1974年には $\text{O} (^1\text{S}_0)$ のいわゆるオーロラ線の発光を利用する希ガス-酸素レーザーが出現した⁹⁾。

現在, 通常エキシマレーザーといえば希ガス-ハライド系のものを指すことが多い。この種のエキシマについては, 1974年頃はじめてレー

*九州大学工学部電気工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*Department of Electrical Engineering, Kyushu University (6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812)

ザー発振の可能性が論じられるようになった^{10,11)}。最初の発振の報告はNRLのSearlesとHartによるXeBrレーザーであるが¹²⁾、AVCO社やノースロップ研究センターからもKrF, XeF, XeClについての報告がほとんど同時に出ており、この時期におけるアメリカでの激しい競争の様子がうかがわれる¹³⁻¹⁵⁾。

以上はいずれも大型のパルス電子ビームによる励起が使われていた。実用性の高い横形放電励起の希ガス-ハライド系エキシマレーザーは、1976年Burnhamらによって報告されたのが最初である¹⁶⁾。後に、水銀-ハライド系でも同様の放電励起による発振が達成されている。

放電励起型の希ガス-ハライド系エキシマレーザーでは、その後速い繰り返しで高い平均パワーを持った製品が開発され、従来にない高効率・高出力の紫外線レーザーとして、光プロセシングやリソグラフィ光源など工業的にも新しい応用分野を開拓しつつある。エキシマがレーザー媒質として優れている大きな理由は、基底状態にもどった分子がただちに解離してしまう点にある。したがって、レーザー遷移の下

位準位分布は常に零と考えてよく、誘導放出を打ち消す吸収が起こらない。

希ガス-ハライド系エキシマレーザーの効率は、放電励起で3~4%に達し、従来のイオン系の紫外線レーザーに比べ非常に高い。イオンレーザーでは短波長になるほどイオンを作るために多くのエネルギーが無駄に消費される。それに対してエキシマレーザーでは、希ガスを準安定準位に励起するだけでエキシマが生成され、励起エネルギーの利用効率が紫外線レーザーとしては非常に高いためである。電子ビーム励起にしろ、放電励起にしろ、エキシマの生成効率は高いので、従来の水銀灯に変わり、エキシマの発光は紫外・真空紫外部のランプとしても有用である。

2. エキシマの分光学^{2,17,18)}

Table I にこれまでに発振が報告されたエキシマとその発振波長を示す。励起源はすべて電子ビームであるが、*印をつけたものは放電励起が可能である。この中で、放電励起により速い繰り返し動作が可能のため、最も実用性が高い希ガス-ハライド系エキシマについて、その

Table I Classification of excimer laser.

Class	Excimer (Laser wavelength [nm])
Rare gas	Ar ₂ (126), Kr ₂ (147), Xe ₂ (172)
Rare gas + Halogen	XeF* (353.1, 351.1, 486) XeCl* (308), XeBr* (281.8) KrF* (248.5), KrCl* (221.1) ArF* (193.2), ArCl* (175) Xe ₂ Cl (518), Kr ₂ F (430)
Rare gas + Oxygen	ArO (458), KrO (558), XeO (558)
Metal + Halogen	HgCl* (552, 555, 558, 559) HgBr* (502, 504), HgI (443, 444) ZnI (600), CdI (665), CdBr (811)

* Discharge pump is possible

Fig. 1 Potential diagram of KrF (Vertical axis is the internuclear distance)¹⁾.

分光学的性質を以下に概説する。希ガス-ハライド系では、Table I に示すように7種のエキシマがレーザー発振しているが、効率やガスの安定性からXeF, XeCl, KrF, ArFの4種が普通よく使われている。F₂ (波長158 nm) も通常の放電型エキシマレーザー装置で発振させられるレーザーであるが、これは機構的にはエキシマレーザーではない。

Fig. 1はKrFのポテンシャルエネルギー図である²⁾。希ガス-ハライドの基底準位は、分光学的には 2Σ と 2Π とよばれる二つの準位から成り立っている。Fig. 1でXが 2Σ , Aが 2Π に相当している。KrFやArFでは、このどちらもポテンシャルのくぼみがない反発型 (repulsive) で、したがって基底準位に落ちたエキシマはただちに希ガス原子とハロゲン原子に分解する。

上位準位にはB, C, Dと名づけられた三種のイオン結合準位が存在する。これらは準安定希ガス原子とハロゲン原子との結合準位ともクロスしているため、後に述べるようにイオンと励起原子の二つのチャンネルでエキシマが生成可能である。選択則からB-X, D-X, C-Aの三種の遷移が予想されるが、電子ビーム励起されたKrFの蛍光スペクトルはFig. 2のようになる。

Fig. 2 Side fluorescence spectrum of KrF pumped by e-beam.

B-X遷移が一番強く、C-A遷移がわずかに観測されている。レーザー発振は、B-X遷移の中心である248.5 nm付近で観測されている。他の遷移が弱いのは、これらの準位の間の混合 (mixing) が大きいと考えられる。XeFの場合のみC-A遷移でのレーザー発振が486 nm付近で観測されている。Kr₂Fというのは三原子エキシマ (trimer) とよばれ、電子ビーム励起で発振し、430 nm付近に広い発光バンドを持つ¹⁹⁾。

一般にエキシマの発光スペクトルがこのように広いのは、基底準位がバウンドフリー (bound free) であるためである。通常的气体レーザーは上下の準位とも束縛されているため、スペクトルは離散的なラインの集まりとなる。それに対して、エキシマの発光は気体でありながらバンド状になる。したがって、特別な制御をしなければ、エキシマレーザーの発振スペクトル幅は通常的气体レーザーより広い。狭いスペクトルを得るには、可変波長レーザーにおけるように、回折格子やエタロンなどの分散素子を共振器内に入れて同調を行なう必要がある。

KrFとArFの分光特性はよく似ていて、B-X遷移でレーザー発振させた場合1~2 nmの波長同調ができる。Fig. 3はArFレーザーのプリズム同調時の同調曲線の例である。規則的に見られるディップは大気中のO₂分子のSchumann-Runge帯による吸収によるもので、ArFレーザーの波長193 nmが、真空紫外域に

Fig. 3 Spectral tuning curve of discharge-pumped ArF laser.

近いことを示している。

それに対して、XeF や XeCl のポテンシャル曲線はFig. 4に示したように、基底準位の $^2\Sigma(X)$ 状態が希ガスとハロゲン原子間の電荷移動効果のため反発型でなくなり、わずかな(XeFで 1200 cm^{-1} , XeClで 281 cm^{-1})ディップが生じる。そのためB-X遷移は通常と同じように、離散的な振動単位を持つようになる。XeF レーザーにおける2本の発振線351.1, 353.1 nmはこの振動単位に対応している。これらのレーザーでは、したがって基底準位が完全

Fig. 4 Potential diagram of XeF⁽²⁰⁾.

に反発的でないために、逆向きの吸収が起こる可能性があるが(これをbottle neckingという), 通常動作状態では熱的解離が速く、あまり問題にならない。

生成したエキシマは放射あるいは周囲粒子の衝突によって分解する。希ガス-エキシマレーザーの場合、F₂ や HCl のようなハロゲンドナーと希ガスのほかに放電型では He や Ne,

Table II Radiative lifetime and quenching constants of B state in rare-gas halide excimers.²⁾

Excimer		KrF	XeCl	ArF	XeF
Radiative lifetime [ns]		6.5, 6.8, 9	41, 11, 27, 10	4.2	12, 18.8 16.5, 13.5
Two-body quenching [cm ⁻³ s ⁻¹]	Halogen	7.8×10 ⁻¹⁰	1.7×10 ⁻⁹	1.9×10 ⁻⁹	3×10 ⁻¹⁰
	Xe	—	3.2×10 ⁻¹¹	—	2.9×10 ⁻¹¹
	Kr	2.0×10 ⁻¹²	—	1.6×10 ⁻⁹	—
	Ar	1.8×10 ⁻¹²	—	9.0×10 ⁻¹²	8×10 ⁻¹³
	Ne	1.6×10 ⁻¹²	1.0×10 ⁻¹²	1.6×10 ⁻¹²	negligible
	He	3.3×10 ⁻¹³	5.0×10 ⁻¹³	—	negligible
Three-body quenching [cm ⁻⁶ s ⁻¹]	2Ar	7.0×10 ⁻³²	—	4.0×10 ⁻³¹	1.5×10 ⁻³²
	2Kr	6.7×10 ⁻³¹	—	—	—
	2Xe	—	7.3×10 ⁻³¹	—	1.0×10 ⁻³⁰
	2Ne	<1×10 ⁻³²	1.0×10 ⁻³³	1.0×10 ⁻³²	2.7×10 ⁻³³
	2He	<1×10 ⁻³³	—	3×10 ⁻³²	—

電子ビーム型では通常 Ar を2~4気圧の高い圧力で混合する。これは後述するようにエキシマの生成効率を高めるためである。

Table II にエキシマのB準位の放射寿命と脱励起定数をまとめた。放射寿命は10 ns程度と短い、高い圧力のため二体・三体衝突による脱励起がかなり速く起こり、エキシマの寿命 τ は2~3 nsと極めて短い。それに対してエキシマの誘導放出断面積 σ は 10^{-16} cm^2 オーダと、バンドが広がっているにしては大きい。この σ と τ の値はほぼ色素レーザーの値に近い。その結果、エキシマレーザーは固体レーザーと違って媒質中エネルギー蓄積のできないレーザーで、ナノ秒オーダのパルス動作を行なうにもかかわらず、定常的な動作をする。 σ が大きいいため、 $10\% \text{ cm}^{-1}$ 以上の高い小信号利得が容易に実現できる高利得のレーザーであるが、励起には高いエネルギー密度が要求される。

3. エキシマレーザーの励起法と構成

3.1 電子ビーム励起

エキシマを生成する励起法には大別すると、電子ビームと放電とがある。

電子ビームは通常相対論的電子ビーム(REB: Relativistic Electron Beam)と呼ばれる短パルス大電流の電子ビーム源が使われる^{2,21)}。REB発生装置は、Fig. 5にその構成を示すように、高電圧発生用のマルクスバンク、パルス整形回路、電子銃よりなるパルスパワー装置で、パルス幅数十 ns~ μs 、加速電圧200 kV~2 MV、電流1~100 kAといったオーダの電子ビームが得られる。パルス整形回路は通常水を絶縁体とした分布定数線路で、スパークギャップで制御することにより、電圧波形を速い立ち上がりの矩形に整形する。

電子銃は多くの場合電界放出による冷陰極型

であるが、電子の放出は陰極表面に形成されたプラズマによると考えられる。陽極は金属フォイルでできており、電子ビームはフォイルをつきぬけて、高圧ガスに入射される。緩衝ガスには阻止能が大きい Ar が1~3気圧で用いられる。レーザーガスに対する電子ビームの入射方向によって縦打込み、横打込み、同軸打込みの三種が使われている。

電子ビーム励起の利点は①励起源とレーザーガスが分離しているため、それぞれのパラメータを最適に設定できること、②大きな体積の媒質を均一に励起できることなどである。その結果、放電励起では発振させられないようなエキシマを発振させることができ、最大 $1 \times 1 \times 2 \text{ m}^3$ の活性体積から10 kJの出力エネルギーを取り出すことが可能となる²²⁾。また入射した電子ビームエネルギーに対する発振効率、KrFの場合10%を越すことが可能である。しかしながら、放電励起におけるような高繰り返し動作は困難であるため、工業的な応用には制限が多い。

3.2 放電励起

放電の形式には横型放電、縦型放電、マイクロ波放電、無声放電などが使われているが、いずれもパルス大電流の放電である。ここでは最も一般的な横型放電について解説する。この他、電子ビームと併用した電子ビーム制御放電方式も大型化をねらって研究されたが、エキシマレーザーに関してはあまりメリットがない。

横型放電技術の基本はTEA CO₂ レーザーにある。高い気圧のもとで大電流の放電を行うと枝状の放電に移行しやすい。横型放電を使うと、放電長が短いため大きな断面にわたって一様な放電が得られ、数 MW/cm³の高い密度のエネルギー注入ができる。その場合安定なグロー放

Fig. 5 Construction of REB generator.

Fig. 6 Electric circuits for TE discharge tube (R_d)
(a) LCR circuit, (b) capacitor transfer circuit
and (c) LC inversion circuit.

電を得るにはガスの予備電離が不可欠である。不均一なアーク放電が起こるとレーザー発振効率を著しく悪化させるだけでなく、電極の損傷やレーザーガスの劣化をまねく。

横型放電では、二本の均一電界型のレール状電極にパルス電圧を印加される。回路的にはFig. 6に示した三種が基本となる²⁾。スイッチには通常サイatron放電管が使われ、コンデンサーには低残留インダクタンスのものを使う

必要がある。チタン酸バリウム等の強誘電体を使った小型の高圧用コンデンサーを並べて使うのは有効である。

最もよく使われているのはFig. 6 (b) の容量移行型で、 C_1 に蓄えられた電荷をスイッチSを閉じることで C_2 に移しかえる^{23,24)}。主放電は C_2 の電圧が上がることで自爆的に起こる。放電の立ち上がりを決めるのは C_2 - L_2 回路の残留インダクタンスで、 C_1 - L_1 については厳しい制限がないので (a) の場合よりスイッチングが楽である。(c) のLC反転回路は C_1 と C_2 を最初逆向きに充電し、Sを閉じることによって C_1 の電圧を反転させるもので、原理的に2倍の電圧を放電管にかけることができる^{24,25)}。

Fig. 6の3回路は、Cの部分分布定数型の平板コンデンサに置きかえることも可能である。(c)を置きかえた場合にはBlumlein回路と呼ばれ²⁶⁾、非常に立ち上がりの速い放電が得られるので、 N_2 レーザーでは好んで用いられる。(b)の C_2 を平板水コンデンサーに置きかえたものは、出力が10 Jオーダの大断面のレーザーに用いられている。この時の回路構成は、Fig. 5のREB発生装置のパルス整形線路(PFL)と同様に、放電管とPFLの間にレールギャップスイッチを入れて、放電電流の立ち上がりを速くする^{27,28)}。

一方予備電離に関しては、①放電管に沿って小ギャップ列を設け、アーク放電のUV光によって電離させるUV予備電離、②誘電体表面でのコロナ放電によるUV光を利用するコロナ予備電離、③放電管の外に設けたパルスX線管によって電離するX線予備電離の3方式が使われている。一長一短があって、使用目的によって使い分けられるべきであるが、市販の高繰り返しレーザーでは、Fig. 6 (b)とUV予備電離を組み合わせた「容量移行自動予備電離方式」が最もよく使われている²⁹⁾。

Fig. 7にこの方式の基本的な構成を示す。この回路の利点は、 C_1 から C_2 へ電荷の移しかえを行なう際、途中に小ギャップ列を設けて火花を飛ばすことで、予備電離と主放電の遅延が自

Fig. 7 Construction of excimer laser with auto-preionized capacitor transfer circuit.

(a)

(b)

Fig. 8 (a) Magnetic assist and pulse compression circuit with saturable reactors, and (b) spiker-sustainer circuit.

動的に行われることである。予備電離の際には、 10^7 cm^{-3} 以上の初期電子数密度が必要で、その分布は主放電の一様性に直接影響するため、できるだけ均一に照射することが重要である。予備電離から主放電までの遅延時間は、電荷の均一化にかかる時間を考慮すると数100 ns～2 μs が最適になる³⁰⁾。

Fig. 7の回路のもう一つの利点は、一次コンデンサー C_1 の回路の電流の立ち上がりはそれほど大きくなくていいことである。そのため、スイッチ素子であるサイラトロンに無理がかからない。さらにサイラトロンの負荷を軽減するために、可飽和リアクターを用いた磁気アシ

トや磁気パルス圧縮回路が開発されている。Fig. 8 (a)はその一例で、可飽和リアクターは電流が増加すると自動的にインダクタンスが減少する非線形的なスイッチ素子として働き、SR1はサイラトロンの初期電流を制限し、SR2は放電管電流の立ち上がりを速くする。

さらにスイッチの長寿命化をはかるために、サイリスター等を用いた固体化が行われている。その場合、従来のサイリスターは電流の立ち上がり時間が遅いため、多段のパルス圧縮が必要であったが³¹⁾、新しいスイッチ素子ではサイラトロン並みに一段の圧縮でも十分で、実用化に向いつつある。

レーザー放電管の等価抵抗は放電電流によって変化する非線形抵抗で、放電初期には大きい。レーザー発振時には0.3 Ω 以下の小さな値になる。したがって電源側の内部インピーダンスは十分低くする必要があるが、放電の全期間にわたってインピーダンス整合をとることは困難である。その点を改善したのがFig. 8 (b)に示すスパイカー・サステナー回路である³²⁾。これは放電開始時は高電圧で速い立ち上がりを持つスパイカー回路が動作し、エネルギーの大部分は低インピーダンスのサステナー回路から注入するもので、XeClレーザーで最大5%の効率が達成されている^{33,34)}。

Fig. 6に示したような容量移行型では、パルス当りの出力エネルギーで1 Jを越えるのは容易でない。ジュールオーダの出力を持つ大断面積のレーザーは、PFL (水またはセラミックコンデンサー)とX線予備電離方式を組み合わせによって得られている。この方式で、XeClの場合最大66 J (パルス幅180 ns)の出力エネルギーが報告されている^{35,36)}。

3.3 ガスの取り扱い

Table III に市販のコンパクトなエキシマレーザーの特性例を示す。希ガスハライド系エキシマレーザーでは、KrFやArFのようなフッ素系ではF₂を、XeClやXeFのような塩素系ではHClをハロゲンドナーとして添加する。ハロ

Table III Performances of typical commercial excimer laser with a compact size (Lambda Physik COMPex 100).

Laser	Gas	Wavelength	Output energy	Average power*
ArF	F ₂ /Ar/He	193 nm	200 mJ	12 W
KeF	F ₂ /Kr/He	248 nm	400 mJ	30 W
XeCl	HCl/Xe/Ne	308 nm	200 mJ	20 W
XeF	F ₂ /Xe/He	351 nm	150 mJ	12 W

* At 100 Hz operation

ゲンガスの分圧は0.5 %以下にすぎないが、有毒で非常に腐食性が強いために多くの技術的な問題が生じる。1台のレーザーでフッ素系と塩素系を混用することはできないと考えた方がいい。ガスの混合比と圧力の最適値は装置によって若干異なるので、実験的に定める必要がある。

ガスは一定量を放電管中に封じ切り、プロワーで循環させる。動作中にガスの劣化によって出力は低下してゆくの、出力を一定に保つには電源電圧を制御する。ガスの寿命を延ばすために外部のガス処理装置を通して循環させることもある。

繰り返し周波数を上げるには、基本的にはガスの循環速度と電源の容量とスイッチ能力を高めればよい。いわゆるCR (Clearance Ratio) 値は良く設計されたレーザーでは1に近づけることができる。小型のレーザーでの繰り返し周波数は500~700 Hzまでが実用レベルである。大型軸流ファンと並列スイッチングを用いて最高5 kHz (出力560 W) が実現している³⁷⁾。

レーザー管内の材料を吟味することによって、ガスの寿命は初期の頃に比べると飛躍的に延びた。一般的に言えば ArF < KrF < XeCl の順に寿命は長くなる。有害な不純物としては大気起源を持つ O₂, H₂O, CO₂, 放電によって発生するハロゲン化物などで、ダストも窓の汚損の原因となる。フッ素系の場合、CF₄, HFが特に重要である³⁸⁾。動作中に減少したハロゲンを補うために、ハロゲンを注入するのはガス寿命を延長するのに効果的である。外部でのガス処理の中では、その他コールドトラップ

がKrF, ArFに対して有効である³⁹⁾。

4. 放電励起エキシマレーザーの動作解析

通常的气体レーザーと違って、エキシマレーザーでは放電管の中で励起やイオン化の他に複雑な化学反応が起こり、20種類近くもの粒子(原子・分子・ラジカル・イオン)が生成する。その化学反応も細かく見れば100種類以上もあるが、原理的にはそれぞれの反応定数が分かっているれば、速度方程式を用いて解析ができる。一番問題になるのは電子衝突項で、この場合には衝突する電子の速度によって大幅に励起・電離・反応の定数が変化する。放電中の電子の速度分布はボツルマン方程式を解くか、モンテカルロ法で計算できる。しかし、放電中は印加電圧の変化により換算電界 (E/N) が時間とともに変化するの、それに応じて電子速度分布を求める必要がある。

放電励起型エキシマレーザーのシミュレーション解析は、最初GreeneとBrauによって試

Fig. 9 Structure of computer simulation code of discharge-pumped excimer laser.

(a) KrF

(b) XeCl

Fig. 10 An example of calculated energy flow diagrams of KrF (a) and XeCl (b) lasers.^{40,41)}

みられ²⁵⁾, 後に著者らはこのコードに基づいて詳細な特性解析を行なった^{40,41)}。これは今日, エキシマレーザーの特性解析の標準的手法になっているので, 概念を述べる⁴²⁻⁴⁴⁾。

Fig. 9)にその計算機コードの構造を示す。予備電離によって定まる電子数から出発して, 時

間さざみで回路方程式を解く。それによって E/N が求められ, ボルツマンコードで電子速度分布が定まる。その結果は, 各種粒子の励起・イオン化・化学反応を記述した速度方程式群に入力され, エキシマの生成数を求める。以後は通常のレーザーの解析と同様で, Table II に示したような緩和と脱励起や, 各種粒子による吸収を計算に入れレーザー出力を求める。

Fig. 10は, 著者らの試作したエキシマレーザーをモデルにして, 上のコードで計算を行なった実例である。KrFとXeClに関し緩衝ガスとしてHeまたはNeを用いた。出力が実際に得られる値よりかなり大き目になっているが, これは脱励起や吸収についてその後得られた新しいデータを入れると, もっと現実に近い値にすることができる。

KrFの場合, エキシマ生成に関する重要な反応は,

の2つである。(1)は準安定原子 Kr^* と F_2 との直接反応で, 励起チャンネルとよばれる。それに対して(2)は三体衝突によるイオン再結合で, イオンチャンネルといわれている。 XeCl の場合には結合エネルギーの関係で(1)にあたる反応は起こらない。高いエネルギーを持つ電子を衝突させる電子ビーム励起では, 緩衝ガスのイオン化によって反応が始まるのに対して, 放電の場合にはエネルギーはほとんど緩衝ガスに注入されることはなく, その影響は電子の速度分布に与える方が大きい。Heの場合特に弾性衝突による損失が大きい。

ボルツマンコードから得られる速度分布は, これらの計算では, かなりマックスウェル分布からはずれたものとなる。しかし最近, 著者らがレーザートムソン散乱法によって放電中のプラズマの電子速度分布を測定したところ, ほとんどマックスウェル分布に近いことが分かった。これは上の解析では電子-電子衝突を考慮していなかったことによるようで, それを考慮する

と測定値とよく合う結果を得た⁴⁵⁾。

なおこの計算は、空間的にはすべてが一様とする零次元解析になっている。したがって、電界や予備電離した電子の不均一による空間分布については、さらに次元を高めた計算が必要になる。

5. むすび

エキシマレーザーは、他の気体レーザーに比べてかなり遅れて登場した。紫外部で数100 Wもの高出力が高い効率で得られるという大変魅力的なレーザーではあるが、これまでにない高い密度の放電エネルギーを、高い気圧のガス中に均一に注ぎ込む放電技術の困難さと、ハロゲンを含むガスの取扱いのやっかいさのために、実用化にはかなりの時間も要した。しかし、主に80年代に展開されたメーカーの開発者達の努力によって、今日では工場の生産ラインの中に組み込んで十分に耐えられる信頼性を持つに至っている。

今エキシマレーザーに与えられた最も大きな課題は、もっと工業的な応用領域を拡大してゆくことであろう。システムの性能は使用する現場との結びつきによって向上してゆくの、工業製品の常であるから、エキシマレーザーの需要をさらに喚起することがレーザーシステムの性能と信頼性の飛躍につながる原動力となるであろう。

参 考 文 献

- 1) C. K. Rhodes ed.: *Excimer Lasers* (Springer-Verlag, 1979).
- 2) 前田三男編: エキシマレーザー (学会出版センター, 1993).
- 3) 渡部俊太郎, 柏木寛: 応用物理 **46** (1977) 978.
- 4) 棧敷一明, 納富良一, 渡部俊太郎: 応用物理 **60** (1991) 875.
- 5) L. Rayleigh: Proc. Royal. Soc. London **A116** (1927) 702.
- 6) N. G. Basov: IEEE J. Quant. Elect. **QW-2** (1966) 354.
- 7) N. G. Basov, V. A. Danilychev, Y. M. Popov and D. D. Khodkevich: Soviet Phys. JETP Lett. **12** (1970) 329.
- 8) H. A. Kochler, L. J. Ferderber, D. L. Redhead and P. J. Ebert: Phys. Rev. **A9** (1974) 768.
- 9) H. T. Powell, J. R. Murray and C. K. Rhodes: Appl. Phys. Lett. **25** (1974) 486.
- 10) M. E. Golde and B. A. Thrush: Chem. Phys. Lett. **29** (1974) 486.
- 11) J. E. Velazco and D. W. Setser: J. Chem. Phys. **62** (1975) 1990.
- 12) S. K. Searles and G. A. Hart: Appl. Phys. Lett. **27** (1975).
- 13) J. J. Ewing and C. A. Brau: Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 350.
- 14) C. A. Brau and J. J. Ewing: Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 435.
- 15) E. R. Ault, R. S. Bradford, Jr. and M. L. Bhaumik: Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 413.
- 16) R. Burnham, N. W. Harris and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 86.
- 17) 島内みどり: レーザー研究 **8** (1980) 875.
- 18) M. H. R. Hutchinson: Appl. Phys. **21** (1980) 95.
- 19) F. K. Tittel, G. Marowsky, W. L. Wilson, Jr. and M. C. Smayling: IEEE J. Quant. Elect. **QE-17** (1981) 2268.
- 20) J. J. Ewing and C. A. Brau: Phys. Rev. **A12** (1975) 129.
- 21) M. Rokni, J. A. Mangano, J. H. Jacob and J. C. Hsia: IEEE J. Quant. Elect. **QE-14** (1978) 464.
- 22) Special Issues of KrF Lasers for ICF, Fusion Tech. **11** (1987).
- 23) A. J. Andrews, A. J. Kearsley, C. E. Webb and S. C. Haydon: Opt. Comm. **20** (1977) 265.
- 24) R. C. Sze and P. B. Scott: Rev. Sci. Instrum. **49** (1978) 772.
- 25) A. E. Greene and C. A. Brau: IEEE J. Quant. Elect. **QE-14** (1978) 951.
- 26) C. Jianwen, F. Shufen and L. Miaohou: Appl. Phys. Lett. **37** (1980) 883.
- 27) M. R. Osborne, P. W. Smith and M. H. R. Hutchinson: Opt. Comm. **52** (1985) 415.
- 28) 挟間寿文, 大内和美, 宮崎健創, 山田家和勝, 佐藤卓蔵: レーザー研究 **14** (1986) 108.
- 29) 戸田祐三, 宮崎健創, 挟間寿文, 山田家和勝, 酒井広文, 佐藤卓蔵: レーザー研究 **12** (1984) 426.
- 30) R. C. Sze: IEEE J. Quant. Elect. **QE-15** (1979) 1338.
- 31) H. Tanaka and M. Obara: Rev. Sci. Instrum. **61** (1990) 1996.
- 32) W. H. Long, Jr., M. J. Plummer and E. A. Stappaerts: Appl. Phys. Lett. **43** (1983) 735.
- 33) G. J. Ernst, F. A. Vangoor, G. B. Ekelmans, M. Trentelman and J. W. Gerritsen: Technical

- Dig. CLEO' 90 (1990) 350.
- 34) 佐藤行雄, 井上満雄, 春田健雄, 永井治彦: レーザー研究 20 (1992) 38.
- 35) L. F. Champagne, A. J. Dudas and N. W. Harris: J. Appl. Phys. 62 (1987) 1576.
- 36) T. Hasama, K. Miyazaki, K. Yamada and T. Sato: IEEE J. Quant. Elect. 25 (1989) 113.
- 37) S. Takagi, K. Kakizaki, N. Okamoto, F. Endo, K. Ishikawa and T. Goto: Technical Dig. CLEO/Pacific Rim' 95 WH4 (1995) 76.
- 38) 渡部俊太郎: O plus E No. 1 (1995) 78.
- 39) R. Tennant: Laser Focus 17 No. 10 (1981) 65.
- 40) 水波 徹, 前田三男, 内野 修, 下村 修, 宮副 泰: レーザー研究 9 (1981) 527.
- 41) M. Maeda, A. Takahashi, T. Mizunami and Y. Miyazoe: Japan. J. Appl. Phys. 21 (1982) 1161.
- 42) T. H. Johnson, L. J. Palumbo and A. M. Hunter, II: IEEE J. Quantum Elect. QE-15 (1979) 289.
- 43) H. Hokazono, K. Midorikwa, M. Obara and T. Fujioka: J. Appl. Phys. 56 (1984) 680.
- 44) M. Ohwa and M. Obara: J. Appl. Phys. 63 (1988) 1306.
- 45) K. Uchino, T. Kubo, H. Dozono, H. Yamakoshi, K. Muraoka, M. Maeda, A. Takahashi and M. Kato: Appl. Phys. B61 (1995) 165.

レーザーワード

エキシマレーザー (excimer laser)

通常基底状態では分子をつくらない希ガスや金属原子が、励起状態あるいはイオン化して形成する分子をエキシマあるいはエキシプレックスと呼び、そのような励起分子を用いた気体レーザーをエキシマレーザーという。エキシマはレーザー遷移の下準位が解離状態で常に分布が零であるため、レーザー媒質として優れている。希ガスエキシマ、希ガスハライド系、金属ハライド系、希ガス酸素系のエキシマにおけるレーザー発振が可視から真空紫外域で、放電や電子ビーム励起によって得られている。高気圧下におけるエキシマの生成効率は高く、紫外線レーザーとしては例外的に高い発振効率を示すものが多い。

(前田 三男)

希ガスハライドエキシマレーザー (rare-gas halide excimer laser)

希ガス (Ar, Kr, Xe) とハロゲン (F, Cl, Br) が化合したエキシマを用いるレーザーで、各種エキシマ中最も高い効率が得られ放電励起による発振が可能のため、通常エキシマレーザーといえはこの種のものをさすことが多い。市販されているのも、今のところこのタイプのみである。中でも ArF (発振波長 193 nm), KrF (248.5 nm), XeCl (308 nm), XeF (353, 351 nm) の四種のエキシマが実用性が高い。これらは横形の放電管で高気圧 (~2気圧), 高電圧 (~20kV), 大電流 (~10kA) のパルス放電励起により速い繰り返しで高効率の発振が可能である。エキシマは励起状態あるいはイオン化された希ガス原子とハロゲンとの反応によって生成され、紫外域で4%台の高い発振効率を得ることができる。

(前田 三男)